

Allgemeine Berechnungsannahmen

Geometrie, Randbedingungen und Stoffgesetz

Es wird bei allen Berechnungen ein ebener Verformungszustand vorausgesetzt. Die seitlichen Ränder und die Netzunterkante werden, jeweils senkrecht zur Kante, mit festen Lagern gehalten. Es wird das elastische ideal-plastische Stoffgesetz mit Mohr-Coulombscher Bruchbedingung angewandt. Grundwasser wird nicht berücksichtigt, für die Beispiele 1 bis 3 werden keine Auflasten angesetzt.

Berechnungsablauf, Ermittlung der Standsicherheit

Die Berechnung besteht aus zwei Berechnungsschritten. Im ersten Schritt wird die Ausgangsspannung als Lastfall Eigengewicht berechnet. Im zweiten Berechnungsschritt werden die Geometrie des Gleitkörpers und die Böschungsstandsicherheit ermittelt. Dies erfolgt über eine Abminderung der Scherparameter (ϕ/c -Reduktion). Dabei werden die Scherparameter ϕ_0, c_0 kontinuierlich reduziert, bis sich der Bruchzustand einstellt. Über die Fellenius-Regel kann anhand der Scherparameter ϕ_{Bruch} und c_{Bruch} bei denen sich rechnerisch der Bruchzustand einstellt, die Standsicherheit ermittelt werden.

$$\text{Sicherheit } \eta = \frac{\tan \phi_0}{\tan \phi_{\text{Bruch}}} = \frac{c_0}{c_{\text{Bruch}}}$$

Das Abbruchkriterium der ϕ/c -Reduktion für die im System vorhandenen Ungleichgewichtskräfte wurde iterativ verschärft, bis sich keine Änderung im Berechnungsergebnis mehr ergab. Ebenso wurde die Netzfeinheit variiert und solange verfeinert, bis der Einfluss der Diskretisierung zu vernachlässigen war.

Beispiel 1: Homogene, dränierte Böschung

In diesem Beispiel wird die Standsicherheit einer homogenen, dränierten Böschung mit dem Neigungsverhältnis 2:1 mit der Methode der Finiten Elemente ermittelt. Die Geometrie und das Elementnetz sind in Bild 1 dargestellt. Für die Berechnung wird ein Elementnetz mit neun-knotigen Vierecken verwendet. Die Anzahl der Elemente beträgt 320. Es wird mit der maximalen Anzahl an Integrationspunkten pro Element (3×3 Integrationspunkte) gerechnet.

Bodenkennwerte

$\phi = 20^\circ, c = 10 \text{ kN/m}^2,$
 $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3,$
 $E = 100 \text{ MN/m}^2, \nu = 0,3.$

Böschungsbrechungsberechnung – Berechnungsbeispiele

Beiblatt zu Empfehlung Nr. 4 des Arbeitskreises 1.6 „Numerik in der Geotechnik“

Professor Tom Schanz, Bauhaus-Universität Weimar, Obmann AK 1.6

Der Arbeitskreis 1.6 „Numerik in der Geotechnik“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. erarbeitet Empfehlungen zur Durchführung numerischer Berechnungen. In *geotechnik* 2006/1, S. 13-27, wurde der Abschnitt 4 der Empfehlungen „Aktuelle Entwicklungen bei Standsicherheits- und Verformungsmessungen in der Geotechnik“ veröffentlicht. Der vorliegende Beitrag ist ein Anhang zu dieser Empfehlung. Er zeigt für unterschiedliche Böschungen die Vorgehensweise bei numerischen Standsicherheitsberechnungen auf.

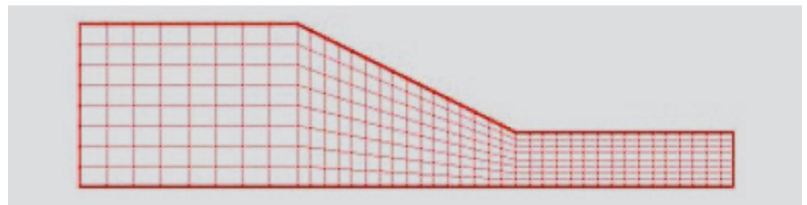
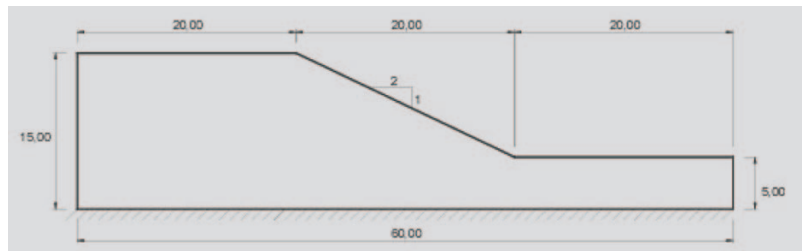


Bild 1. Geometrie und Elementnetz, Beispiel 1.

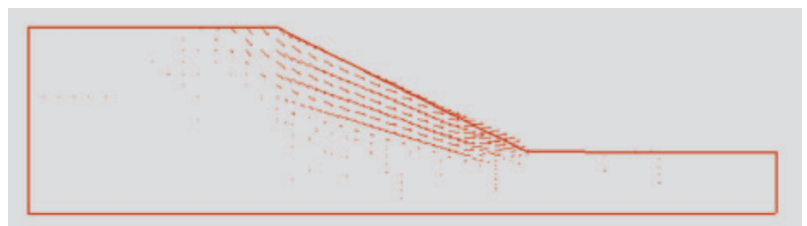


Bild 2. Gleitkörper, Beispiel 1.

Böschungsstandsicherheit

Bild 2 zeigt den Verschiebungsplot im rechnerischen Bruchzustand. Der aus der ϕ/c -Reduktion ermittelte Sicherheitsfaktor beträgt 1,38. Eine Vergleichsberechnung mit konventionellen

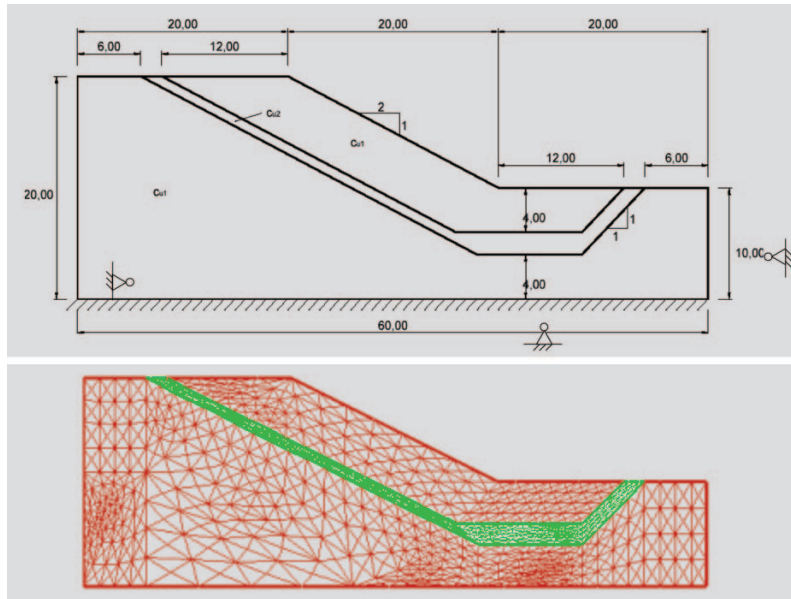


Bild 3. Geometrie und Elementnetz , Beispiel 2.

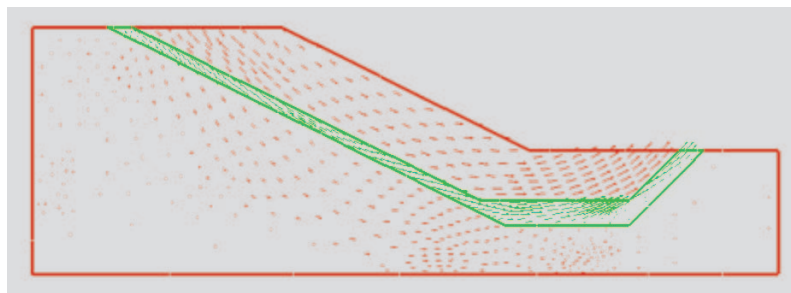


Bild 4. Gleitfläche, Beispiel 2.

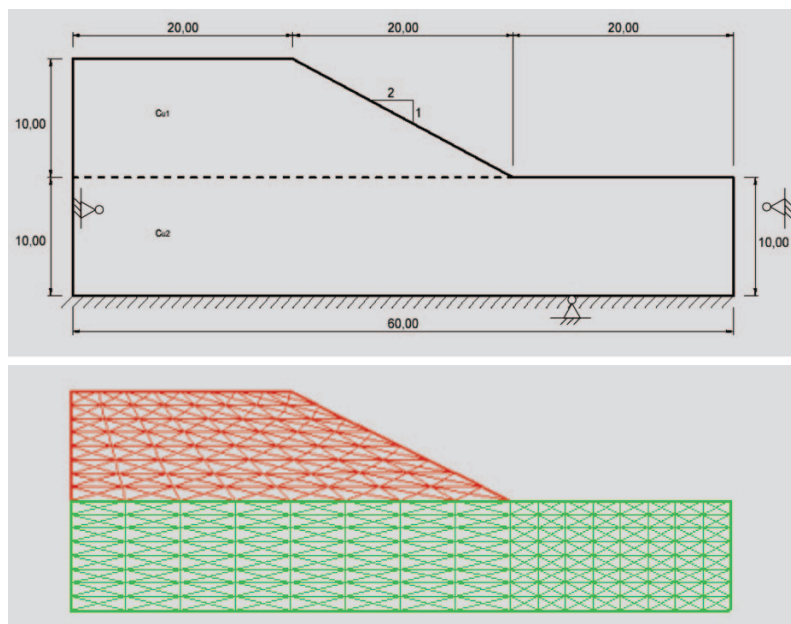


Bild 5. Geometrie und Elementnetz, Beispiel 3a.

Berechnungsverfahren nach Bishop entsprechend DIN 4084 ergibt $\eta = 1,37$.

Beispiel 2: Undrained Böschung mit dünner, gering scherfester Schicht

In diesem Beispiel wird die Standsicherheit einer undrained Böschung mit dem Neigungsverhältnis 2:1, innerhalb derer sich eine dünne, wenig scherfeste Schicht befindet, mit der Methode der Finiten Elemente ermittelt. Die Geometrie und das Elementnetz gehen aus Bild 3 hervor. Für die Elementierung werden sechsknotige Dreiecke verwendet, die Elementanzahl beträgt 1 856.

Bodenkennwerte

- Böschung:
 - $\phi = 0^\circ$, $c_{u1} = 50 \text{ kN/m}^2$,
- Dünne Schicht:
 - $\phi = 0^\circ$, $c_{u2} = 25 \text{ kN/m}^2$,
 - $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$,
 - $E = 100 \text{ MN/m}^2$, $\nu = 0,3$.

Böschungsstandsicherheit

Bild 4 zeigt den Verschiebungsplot im rechnerischen Bruchzustand. Die Gleitfläche ist in diesem Fall durch die gering scherfeste Schicht vorgegeben.

Die aus der ϕ/c -Reduktion ermittelte Böschungsstandsicherheit beträgt 1,17. Eine Vergleichsberechnung mit Starrkörperbruchmechanismen entsprechend DIN 4084 ergibt eine Sicherheit von $\eta = 1,25$.

Beispiel 3a: Homogene, undrained Böschung auf Basisschicht hoher Scherfestigkeit

In diesem Beispiel wird die Standsicherheit einer homogenen, undrained Böschung mit dem Neigungsverhältnis 2:1, die auf einer Basisschicht (auch homogen, undrained) aufliegt, mit der Methode der Finiten Elemente ermittelt. Die Festigkeit der Basisschicht beträgt das Vierfache der Böschungsfestigkeit. Die Geometrie und das Elementnetz gehen aus Bild 5 hervor. Für die Elementierung werden sechsknotige Dreiecke verwendet, die Elementanzahl beträgt 768.

Bodenkennwerte

- Böschung:
 - $\phi = 0^\circ$, $c_{u1} = 50 \text{ kN/m}^2$,
- Basisschicht:
 - $\phi = 0^\circ$, $c_{u2} = 200 \text{ kN/m}^2$,
 - $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$,
 - $E = 100 \text{ MN/m}^2$, $\nu = 0,3$.

Böschungsstandsicherheit

Bild 6 zeigt den Verschiebungsplot im rechnerischen Bruchzustand. Hier schert nur die Böschung oberhalb der festen Basisschicht ab.

Die ϕ/c -Reduktion ergibt für das untersuchte Beispiel mit $c_{u2}/c_{u1} = 4,0$ einen Sicherheitsfaktor von 2,03. Eine Vergleichsberechnung mit konventionellen Berechnungsverfahren nach Bishop entsprechend DIN 4084 ergibt $\eta = 2,04$.

Beispiel 3b: Homogene, undrained Böschung auf Basisschicht gleicher Scherfestigkeit

In diesem Beispiel wird die Standsicherheit einer homogenen, undrained Böschung mit dem Neigungsverhältnis 2 : 1, die auf einer Basisschicht (auch homogen, undrained) aufliegt, mit der Methode der Finiten Elemente ermittelt. Die Festigkeit der Basisschicht entspricht der der Böschung. Die Geometrie und das Elementnetz entsprechen Beispiel 3a (vgl. Bild 5).

Bodenkennwerte

- Böschung:
 - $\phi = 0^\circ, c_{u1} = 50 \text{ kN/m}^2,$
- Basisschicht:
 - $\phi = 0^\circ, c_{u2} = 50 \text{ kN/m}^2,$
 - $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3,$
 - $E = 100 \text{ MN/m}^2, \nu = 0,3.$

Böschungsstandsicherheit

Bild 7 zeigt den Verschiebungsplot im rechnerischen Bruchzustand. Hier verläuft die Gleitfläche tief durch die Basisschicht.

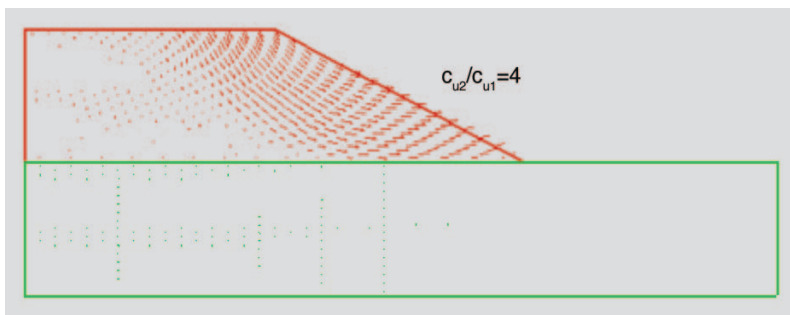


Bild 6. Gleitkörper, Beispiel 3a.

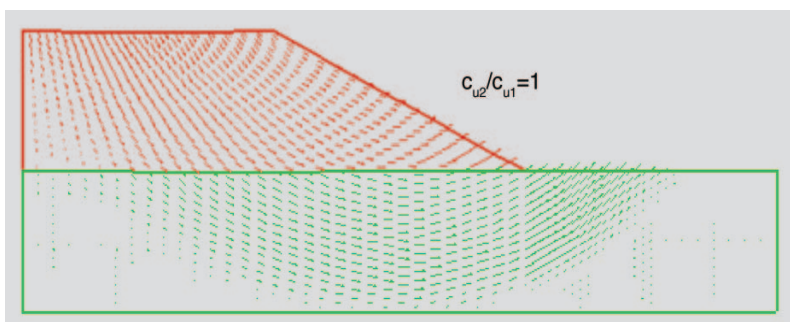


Bild 7. Gleitkörper, Beispiel 3b.

Die ϕ/c -Reduktion ergibt für dieses Beispiel mit $c_{u2}/c_{u1} = 1,0$ einen Sicherheitsfaktor von 1,41. Eine Vergleichsberechnung mit konventionellen Berechnungsverfahren nach Bishop entsprechend DIN 4084 ergibt $\eta = 1,48$.

BÜCHER und mehr ... in der VGE-Versandbuchhandlung

Service

Die VGE-Versandbuchhandlung ist ein modernes Kunden-Servicecenter, dessen oberstes Gebot die individuelle Erfüllung spezieller Kundenwünsche ist, so bei Rechenaufteilung und -rhythmus, gleich ob bei der Lieferung oder gesammelt zum Monatsende, aufgeteilt nach Kunden-Vorgaben.

- **Fachbücher**
- **Sachbücher**
- **Lehrbücher**
- **Belletristik**
- **Kinder- und Jugendbücher**
- **Reiselektüre**
- **Loseblattwerke**
- **Zeitungen und Zeitschriften**
- **Neue Medien**

- Im Ruhrgebiet liefert VGE mit eigenem Kurier, darüber hinaus durch bewährte Dienstleister.
- VGE stellt kostenlos Vorschlags- und Auswahllisten zu vom Kunden gewünschten Themen zusammen. Neben der Literatur-Recherche wird ein Neuerscheinungen-Service geboten.
- Als Geschenkservice zu besonderen Anlässen übernimmt VGE Verpacken und Versand der Bücher und stellt vorab individuelle Titelvorschlagslisten zusammen.

DIN -Normen

VGE ist Beuth-Depotbuchhandlung. Das bedeutet für die Kunden einen schnellen Zugriff auf sämtliche DIN-Normen. Alle DIN-Taschenbücher werden von VGE zum sofortigen Zugriff vorgehalten.

Sie können bei uns in jeder Form bestellen:

- Per Brief
- Telefon +49 (0) 20 54 / 9 24 - 2 02 und - 2 04
- Fax +49 (0) 20 54 / 9 24 - 2 09
- E-Mail buchhandel@vge.de
- Internet www.vge.de/buchhandel

Kundenbetreuung

wird bei der VGE-Versandbuchhandlung groß geschrieben. Die VGE-Mitarbeiterinnen betreuen Sie persönlich und individuell.

Aktuelle **Buchtipps** finden Sie auf unserer Homepage www.vge.de/buchhandel

VGE Verlag GmbH
 VGE Verlag GmbH
 Versandbuchhandlung
 Postfach 18 56 19 · 45206 Essen
 Montebruchstraße 2 · 45219 Essen

Beispiel 4: Vernagelte Böschung

In diesem Beispiel wird die Standsicherheit einer vernagelten Böschung (70° Neigung) mit der Methode der Finiten Elemente ermittelt. Es werden

Bild 8. Geometrie und Elementnetz, Beispiel 4.

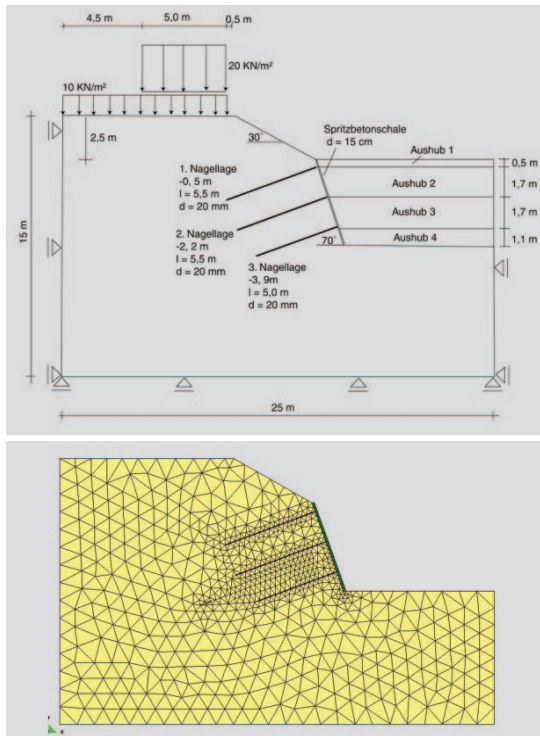


Bild 9. Verteilung der zulässigen Nagelkraft über einen Nagel.

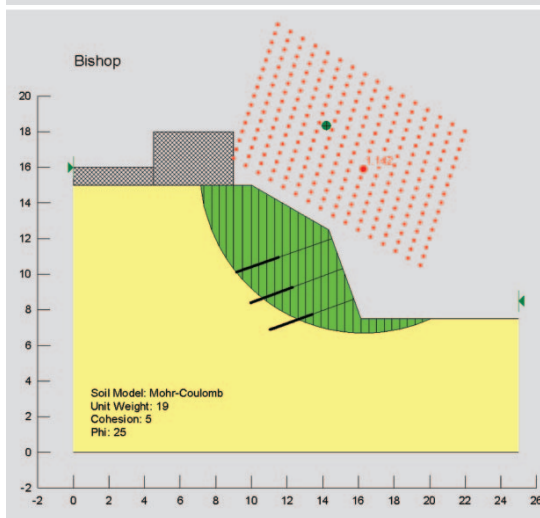
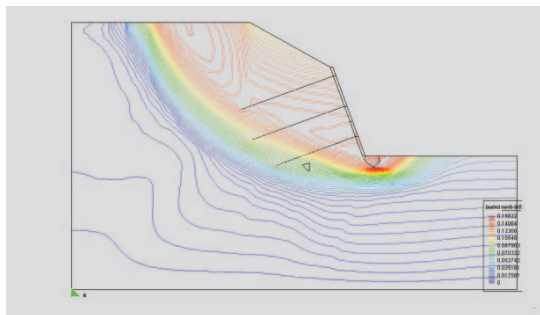
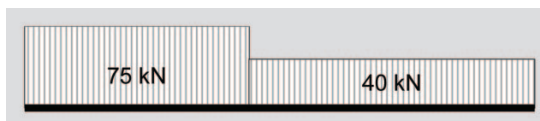


Bild 10. Gleitkörper Beispiel 4: oben FEM, unten aus Nachweis nach Bishop.

drei Nagelreihen angesetzt, die Böschungsoberfläche wird mit Spritzbeton gesichert. Direkt an der Böschungskante werden Natursteine gelagert. In der Berechnung werden die einzelnen Aushubphasen berücksichtigt (Bild 8).

Für die Elementierung des Bodens sowie der Spritzbetonschale werden dreiknotige Dreieckselemente verwendet, die Elementanzahl beträgt 3 362, von denen 77 Stabelemente sind. Die Knotenanzahl beträgt 1 729. Die Nägel werden als Stabzugelemente eingegeben. Für die Nägel wird eine maximal zulässige Last definiert.

Berechnungswerte

Auf der Böschungskrone wurde eine Gleichflächenlast von 10 kN/m² angesetzt, im Bereich der gelagerten Natursteine werden weitere 20 kN/m² berücksichtigt (vgl. Bild 7).

► Bodenkennwerte:

$$\begin{aligned} \varphi &= 25^\circ, c = 5 \text{ kN/m}^2, \\ \gamma &= 19 \text{ kN/m}^3, \\ E &= 8 \text{ MN/m}^2, \nu = 0,37, \end{aligned}$$

► Spritzbeton:

$$\begin{aligned} \gamma &= 25 \text{ kN/m}^3, \\ E &= 15.000 \text{ MN/m}^2, \nu = 0,18, \end{aligned}$$

► Nägel:

$$\begin{aligned} E &= 30\,000 \text{ MN/m}^2, d = 20 \text{ mm}, \\ \text{Horizontaler Nagelabstand: } &1,0 \text{ m}. \end{aligned}$$

Die maximal zulässige Last der Nägel wird wie folgt festgelegt (Bild 9):

- ◊ Von Nagelanfang bis 2,5 m: $F_{zul} = 75 \text{ kN}$,
- ◊ Von 2,5 m bis Nagellende: $F_{zul} = 40 \text{ kN}$.

Berechnungsablauf

Die Berechnung besteht aus fünf Berechnungsschritten:

- ◊ Primärspannungszustand,
- ◊ Aushub 1,
- ◊ Aushub 2, erste Nagelreihe ist eingebaut,
- ◊ Aushub 3, zweite Nagelreihe ist eingebaut,
- ◊ Endaushub, dritte Nagelreihe ist eingebaut,
- ◊ φ/c -Reduktion.

Der Einbau der Spritzbetonschale verläuft sukzessive mit dem Aushub.

Böschungsstandsicherheit

Bild 9 zeigt den rechnerischen Bruchzustand aus der FE-Berechnung und aus dem Nachweis nach Bishop. Die φ/c -Reduktion ergibt einen Sicherheitsfaktor von 1,07. Eine Vergleichsberechnung mit konventionellen Berechnungsverfahren entsprechend DIN 4084 nach Bishop ergibt $\eta = 1,14$.

Quellennachweis

SCHANZ, T. (2006): *Aktuelle Entwicklungen bei Standsicherheits- und Verformungsberechnungen in der Geotechnik – Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 „Numerik in der Geotechnik“, Abschnitt 4. geotechnik 29, Nr.1, S. 13-27.*